

TABLE OF CONTENTS

Newsletter of the Japanese Society for Mathematical Biology	No. 103	May 2024
第34会日本数理生物学会大会 (JSMB2024)		1
KSMB – SMB2024Seoul と若手渡航費用助成		2
第9回数理生物学交流発表会	佐藤 一憲	3
2023年度卒業論文・修士論文・博士論文		6
【特集記事】		
数理モデルと政策：コロナ危機からの教訓	仲田 泰祐	8
学会事務局からのお知らせ		14

日本数理生物学会 ニュースレター

第103号
2024年5月



第34回日本数理生物学会大会 (JSMB2024)

日時：2024年9月11日（水）、12日（木）、13日（金）
場所：北海道大学 学術交流会館（〒060-0808 北海道札幌市北区北8条西5丁目8-1）
大会実行委員長：中岡慎治（北海道大学大学院先端生命科学研究院 snakaoka@sci.hokudai.ac.jp）
大会ホームページ：<https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/jsmb2024>

第34回日本数理生物学会大会を、2024年9月11日～13日に、北海道大学関係者の協力により運営することになりました。会場は北海道大学内の学術交流会館を利用して開催いたします。

本大会は2017年に北海道大学にて年会在開催されて以来、7年ぶりに札幌で開催される数理生物学会です。昨今の新型コロナウイルス感染症流行に鑑み、近年の年会ではオンライン開催またはハイブリッド開催となっておりますが、今年度は久しぶりの対面開催として準備を進めております。このニュースレターでのご案内は最小限にとどめさせていただきますが、問い合わせ先等を含む詳細につきましては上記大会ホームページを随時ご確認頂きますようお願い致します。すでに企画シンポジウムの公募を開始しております。秋の足音が聞こえ始める札幌にて、皆様の多数のご参加をお待ちしております。どうぞよろしくお願い致します。

大会実行委員
中岡慎治（北海道大学）、山口諒（北海道大学）

KSMB – SMB2024Seoul と若手渡航費用助成

KSMB-SMB2024Seoulのご案内

今年は北米数理生物学会（SMB）と韓国数理生物学会（KSMB）の合同大会が韓国ソウルで開催されます。JSMBを代表して会長の時田が学術委員として、また、李聖林さんが大会運営委員として参画し、望月敦史さんのプレナリ講演も行われます。近場でSMB会員と交流する絶好の機会でもありますので、奮ってご参加ください。この会議については、以下の通りファンドをもたない若手研究者・大学院生の会員の旅費宿泊費の一部を助成します。

KSMB-SMB2024Seoul

(韓国数理生物学会・北米数理生物学会合同大会)

会期：2024年6月30日-7月5日

会場：KonKuk University, Seoul, Republic of Korea

会議 Web: <https://smb2024.org/>

KSMB-SMB2024Seoul 若手渡航費用助成

日本数理生物学会は、2024年6月30日から7月5日にかけて韓国ソウルで開催されるKSMB-SMB2024Seoul (<https://smb2024.org/>)に参加する博士後期課程大学院生および若手研究者の会員への渡航助成を行います。該当する学生・若手会員の方は奮ってご応募ください。

応募資格

1. 日本数理生物学会会員もしくは学生会員であること。

2. KSMB-SMB2024Seoulで口頭発表すること。

3. 自身もしくは指導教員がファンドをもたない博士後期課程在籍の大学院生もしくは若手研究者であること。

応募書類

1. 学会所定の応募書類

2. 口頭発表のアクセプト通知メールコピー

3. 応募者もしくはその指導教員がファンドを持たないことを示す指導教員もしくは推薦者の簡単な推薦書

4. 応募資格と助成金の使用に関する学会所定の誓約書

1, 4は学会 Web の「KSMB-SMB2024Seoul 若手渡航費用助成」ページからダウンロードして記入し、1-4を単一のPDFにまとめたファイルを事務局 (secretary@jsmb.jp)宛メールに添付して件名を「海外渡航費用助成」として送付すること。

締切：2024年5月31日

人数：5名を上限とする。

選抜：5名を超える応募があった場合は、事務局もしくは事務局が委嘱する会員からなる審査委員会で選抜を行う。

助成額：ひとり10万円を上限に旅費宿泊費の一部を助成する。

助成金の支払い：助成金は、領収書、JSMB Bulletinsへの掲載を前提とする参加報告書の提出と引き換えに応募者の銀行口座に振込む。

第9回数理生物学交流発表会

2024年3月6日(水)～7日(木) 静岡大学浜松キャンパス



佐藤一憲*

5年ぶりに、静岡大学浜松キャンパスの教室で交流発表会をおこないました。参加者の皆さんは、他大学の皆さんと交流して、対面ならではの有意義な時間を楽しんでいただけたようです。

6名の参加者から参加記を寄せていただきました。お名前の50音順に掲載いたします。



発表会場の様子

■ 赤尾 マルワ (名古屋大学 理学研究科 理学専攻 生命理学領域 修士課程2年 異分野融合生物学研究室)

私は昨年に引き続き、今年も数理生物学発表交流会に参加させていただきました。今回は、「骨代謝細胞と骨代謝マーカーの数理的解析による骨粗鬆症の理解」というタイトルで研究発表をさせていただきました。私は現在、骨粗鬆症の発症メカニズムを定量的に理解する研究を行っています。骨中の細胞やタンパク質の時間変化を数理モデルで表し、共同研究により提供いただいたマウスの実験データと合わせて解析することで、骨がどのようにして脆くなり骨粗鬆症に至るのか解明しようとしています。質疑や休憩の時間などで発表内容についての質問やコメントをいただき、改善点を見出すことができました。

数理生物学発表交流会の参加者には、数理生物と言っても非常に多種多様なトピックやアプローチで研究されている方がいらっしゃいました。物理・数学色の強い研究発表も多く、自身の知識の不十分さを認識すると同時に、新たな課題や興味、自身の研究への応用の可能性を見つける機会となりました。

*静岡大学工学部

また、懇親会では、他大学の学生との交流や、先生方とお話することができました。去年はオンライン開催でしたので、初の現地参加を楽しむことができました。今後はさらに成長した姿で参加できるよう、一層精進してまいります。

最後に、ご質問やアドバイスをくださった皆様、本交流会を企画および運営してくださった皆様にこの場を借りて心より感謝申し上げます。



懇親会の様子(1)

■ 大橋 一輝 (静岡大学工学部数理システム工学科 4年)

今回、初めて数理生物学交流会に参加させていただきました。1年間、研究してきた成果を学外の方々の前で発表することができ、大変良い機会になりました。また、他の大学で同世代の方が取り組んでいらっしゃる研究内容に触れることができ、有意義な時間を過ごせました。

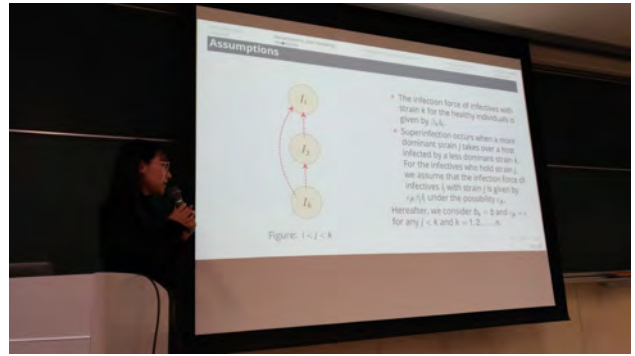
私は、数理科学の学問を用いて、土木の構造力学に関する分野に取り組んだ研究成果を発表させていただきました。研究成果に対して、様々な意見やご指摘をいただき、多くの改善点も見つかりました。一方で、他大学の方々の研究は多様な分野のテーマに対して多様なプロセスで取り組んでいらっしゃっており、大変興味深いと感じました。それと同時に、自分とは違った考え方、研究の進め方があり、自らの視野を広げることができました。

懇親会では、研究の話はもちろんのこと、大学生活などのプライベートなことまで様々、お話をさせてい

いただきました。また、他大学の教授の方ともお話しする機会があり、貴重な時間を過ごすことができました。

4月からは公務員の技官として就職をしますが、実務経験を積んでから、大学院に進むことを検討しています。今回の交流会で得たものも1つの武器としてしっかりと実務経験を積み、日本国の問題を把握して、次なる研究につなげられたらと考えております。

最後に、第9回数理生物学交流会の開催にあたって企画・運営を行ってくださった先生方には感謝申し上げます。



発表の様子 (1)

大学の皆さんの研究をお聞きし、今後の研究につなげていくことができる良い機会とできました。

今回私たちは、移動を考慮したがん発生モデルの数理解析(佐野)、フラクタル次元を用いた肝臓形態比較とそのメカニズム推測(小山)、拡散異方性により形成されるチューリング三角形模様の向きの解析(徳岡)を発表させていただきました。発表後の質疑応答の時間をいただきました。その時間だけではなく、すべての方の発表が終わった後にも、発表を聞いてくださった先生方からの質問やアドバイスをいただくことができ、今後の研究に非常に勉強になる良い機会でした。私たちは4月には全員大学院生になりますが、さらに研究を重ね、磨きをかけていきます。

また、懇親会や発表の合間の休憩時間では、静岡大学の大学生・大学院生の方と、研究をはじめとしたさまざまな話を聞くことができました。2日間という短い期間ではありましたが、大いに交流を深めることができました。

最後にはなりますが、本交流会を主催してくださった佐藤一憲先生をはじめとして運営に携わった多くの先生方、さまざまな場所を案内し教えてくださった静岡大学の皆様に、この場を借りて感謝申し上げます。本当にありがとうございました。



懇親会の様子 (2)

■ 加藤 聡恵 (静岡大学工学部数理システム工科学部 4年)

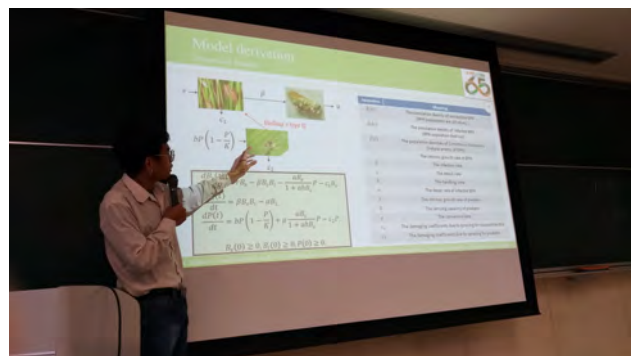
今回数理生物学交流発表会に初めて参加させていただきました。私は数理モデルの中でも投票モデルを用いた研究発表でしたが、他の方の発表を聞くことで、様々な分野で数理モデルを用いた研究がされていることを改めて感じる機会となりました。他の方々の発表内容を興味深く感じ、学ぶことが多くありました。

また、懇親会などで他大学の方と交流したことで、刺激をもらいました。大学院へ進学後も研究に意欲的に取り組み、より良い成果発表や意見交換ができるように努めていきたいとより思うことができました。

最後に、今回の数理生物学交流発表会を企画および運営してくださった佐藤先生をはじめとする諸先生方に深く感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

■ 佐野 英輝 (関西学院大学大学院理工学研究科数理解科学専攻 昌子研究室 修士1年)・小山 紗歩・徳岡 奏里 (関西学院大学理工学部数理科学科 昌子研究室 4年)

今回初めて数理生物学交流会に参加させていただきました。私、佐野は修士論文の中間報告として参加させていただきました。交流会では、他大学の方をはじめとして多くの質問や助言をいただき、また、数理生物学の分野をあらゆる角度から取り組んでおられる他



発表の様子 (2)

■ 忠内 智暉 (静岡大学工学部数理システム工科学部 4年)

第9回数理生物学交流発表会に参加させていただき、ありがとうございました。私は今回初めての参加になりましたが、様々な他大学の皆様の研究発表を聞く機会は貴重なため、とてもいい経験になりました。

私は空間構造のある進化ゲームでムカデゲームを用いた研究発表をさせていただき、シミュレーションで別の方法もある等のアドバイスもいただきましたが、うまく答えられない質問もあったことは反省点です。他の方々の発表では感染症モデルや囚人のジレンマゲームでの空間構造を用いた研究など、今後の自研究の参考になる発表が多くとても勉強になりました。また似た研究以外の発表でも、研究の発想や発表スライドの構成等、勉強になるものが多くありました。初日発表後の懇親会では、他大学の方々とそれぞれの研究についてだけではなく互いの大学の田舎度合、都会度合等を話し、交流を深めることができたいい時間となりました。大学卒業後は就職するため研究発表は今回が最後になりますが、取り組んできた研究を下の代に引き継ぐことができればと思います。また数理生物学交流発表会以外にも、他大学の人と研究を発表しあい、交流を深めることの良さを伝えようと思います。

最後に、交流発表会の企画・運営をしてくださった佐藤先生をはじめとする先生方、遠くからお越しいただいた各校の皆様にご心より感謝申し上げます。

■ 平野 広大 (静岡大学数理システム工学科4年)

私は今回初めて数理生物学交流会に参加し、2次元格子空間上の感染症における毒性の進化について発表させていただきました。つたない発表ではありましたが、他大学や静岡大学の他研究室の方々から私が気づかなかったところや研究方針にアドバイスをいただいたので、今後の研究に活かせればと思っています。

私にとって他大学の研究発表を拝聴するのが初めてであり、とても貴重な機会となりました。研究発表は興味深く、私が研究している内容に関連する研究であってもアプローチが違っていたりしてとても勉強になりました。また、研究内容だけでなく研究方法、スライド、発表なども人それぞれ違い、参考になったと同時に刺激を受け、自分の研究を進めるモチベーションとなりました。

1日目の発表の後に開催された懇親会では、他大学の方々と交流することができ、研究の話に加えて、地元の話、趣味の話など様々な話が聞けて楽しい会となりました。

今回の数理生物学交流会に参加することで、多くの学びがあり、様々な方々と交流ができ、研究について視野が広がったと実感しています。最後になりますが、数理生物学交流会を開催していただいた先生方、そして遠くからお越しになった各校の皆様にご心より感謝申し上げます。



発表の様子 (3)

【特集】

2023年度 卒業論文・修士論文・博士論文

博士論文

Victor SCHNEIDER

東北大学大学院情報科学研究科 情報基礎科学専攻

Population dynamics models on the species persistence in the native habitat with the invasion of alien species

In the face of ongoing loss of biodiversity and habitat transformations, understanding the complex dynamics governing species survival and competition is critical. This dissertation explores the interplay between alien and native species within the context of an invasion, using mathematical modeling and analysis. We first study a two patches model, with an alien species migrating into and out of a native species habitat while competing with them for resources. We continue onto modeling the previous situation as a continuous space, with no flux boundaries conditions. We then examine the effect of fragmenting the native species habitat. Our results reveal that high immigration rates for the alien species can negatively affect the native species persistence while also increasing the chances of the alien species extinction. Smaller total habitat increases the chance of a failed invasion if the alien species faces substantial competition. However, if the size of the native species habitat decreases, an initially unsuccessful invasion could become successful. Finally, habitat fragmentation can be beneficial for the persistence of the native species by moderating the competition with an alien species in each patch or by changing the resource availability. These findings challenge traditional models and offer nuanced insights into the complex dynamics of species competition and survival. They have implications for both theoretical ecology and practical conservation efforts, providing a stepping stone toward a deeper understanding of species interactions and the effects of habitat transformations.

Ying XIE

東北大学大学院情報科学研究科 情報基礎科学専攻

Population dynamics models on the relation of social nature to the epidemics

In this work, we consider three mathematical models incorporating social response, community's policy, and detectability of infection, respectively. The analysis on the model with the incorporation of social response which can affect the infection rate, shows that the social response could become a cause of recurring outbreaks whilst it must suppress the prevalence. The model on the spread of a reinfectious disease under the assumption that a certain proportion of visitors are immune, we find that the acceptance of visitors could either suppress or support the disease's endemicity. Furthermore, we consider a model on the disease spread by multiple strains which follow an order of competitive dominance according to the infection success in the host. This model shows that, strains could coexist with the existence of superinfection. Otherwise, the disease becomes eliminated or alternatively the endemic state arises with only the strain which has the largest strain-specific basic reproduction number while all the other strains get eliminated.

堀口修平

東京大学大学院情報理工学系研究科数理情報学専攻

凸関数が誘導する変分構造を用いた集団動態のモデリングと制御

化学反応や多細胞生物、感染症などの集団動態において秩序形成の原理を理解し制御することは自然科学のみならず社会的にも重要な課題である。しかし集団動態の数理モデルがもつ非線形性や非負性・内在的確率性といった特徴を考慮した数理的基盤は十分に確立されていない。本研究では、化学反応系や制御理論の知見を活用することでこれらの困難を克服し集団動態のモデリングと制御のための新しい方法論を提案する。まず、集団動態のモデルとして凸関数から誘導される力学系クラスを導入した。これは古典的な勾配流を一般化した力学系であり、細胞集団動態に適用することで細胞集団全体の機能と各細胞のふるまいの関係を調べるための基本的な枠組みを提供できた。実際、免疫

応答における T 細胞数の変化のモデルをこの枠組みで解釈することに成功した。次に集団に対して外部から介入する制御の問題として、安定化制御と最適制御の問題に取り組んだ。非線形性や非負性を加味しつつ汎用的に利用可能なフィードバック制御手法を提案し、安定化が保証される必要十分条件を明らかにした。小集団において現れる確率性を踏まえた最適制御問題については、KL ダイバージェンスの誘導する変分構造を用いると最適解を解析的および数値的に容易に計算できることを明らかにした。以上の結果を Brusselator や出生死滅過程、SIR モデルといった具体例で数値的に検証した。

【特集記事】

数理モデルと政策：コロナ危機からの教訓

仲田泰祐*

私の専門は、マクロ経済学、特に金融政策の理論的分析である。コロナ危機直前までアメリカの中央銀行（連邦準備制度理事会・通称FRB）で金融政策に関する学術研究・政策分析に長年従事していた。しかしながら、2020年末にコロナ感染症対策と社会経済活動に関する分析を開始し、様々な偶然の重なりにより、2021年・2022年には日本で政府コロナ対策有識者会議・官邸等で何度もコロナ感染動向やコロナ危機の社会的影響に関する分析を発表することとなった。また、この時期にはメディアでも頻繁に分析を発信することとなった。

日本では感染症数理モデル分析の政策活用が他先進国と比較して遅れていることが指摘されている（稲葉（2020））。コロナ危機においては、感染の見通しを立てることや政策効果を定量化することの重要性が政策現場で認識されたこともあり、感染症数理モデル分析が様々な局面で活躍した。今回の経験にもとづき、今後の日本においては、感染症対策を議論する場面で数理モデル分析の果たす役割は大きくなると考えられる。

この寄稿では、感染症数理モデル分析を今後感染症政策に活用する際の一助となることを願い、コロナ禍における感染症数理モデル分析・またより広くコロナ禍におけるモデル・データ分析を振り返る。日本政府は様々な感染シミュレーションを参照する体制を徐々に確立したが、なぜ政策分析において分析の多様性が重要かについても論じる。そして、今後のパンデミック対策への教訓と感染症数理モデル研究に日々励む研究者の方々へのメッセージで本稿を締めくくりたい。

1. 政策分析のイメージ

日本のコロナ対策に関する数理モデル分析・データ分析を振り返る前に、まずは「政策決定に有用な分析とは何か」について議論する。

「政策決定に有用な分析」は大きく二つに分類できる。一つ目は、政策がさまざまなアウトカムに与える影響に関する分析（政策効果分析）、二つ目は、多くの場合異なるアウトカムの間で何かしらのトレードオフが発生することを所与として、「バランスの取れた政策とは何か」を問う分析である。後者の分析の最も

シンプルな形は「費用対効果分析」であるが、本格的に追及しようとするとは比較的高度な意思決定論に基づいた数理モデル分析が必須となる。紙面の都合上、以下では前者の政策効果分析についてのみ議論する。

図1は、政策が様々なアウトカムに影響を与えるというイメージを共有するための図である。政策効果は、政策がある特定のアウトカムに与えるポジティブな影響だけでなく、ネガティブな影響（副作用）も含む。

図1：政策と政策に影響を受ける様々なアウトカム



このイメージをさらに具体的にするために、行動制限政策と伝統的金融政策（短期政策金利の調整）がどういったアウトカムに影響を与え得るかを図2・図3で示している。

図2：行動制限政策に影響を受ける様々なアウトカム

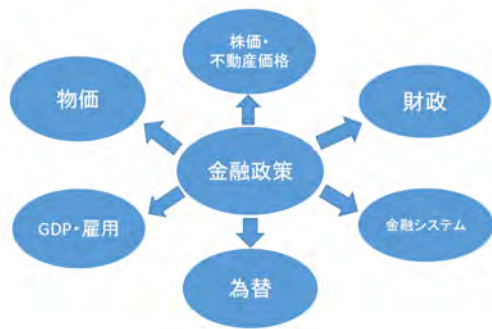


行動制限政策は、感染拡大を抑制することを目的としている。したがって、まずは感染への影響、そして

*東京大学大学院経済学研究科

それを通して重症患者数・死者数といったアウトカムが重要であると考えられる。その一方で行動制限政策は社会経済に負の影響をもたらす懸念もある。例えば人と人との接触を減少させるためにレストランやバーなどの営業に制限をすると、飲食店の売り上げ・個人消費は減少する。人と人との接触を減少させるために学校を休校にすると、子供たちの健康や発育に影響を与える可能性がある (Takaku and Yokoyama (2021))。また人と人との接触の減少は若者の出会いの減少を通して婚姻数を減少させるかもしれない (千葉・仲田 (2023))。そして婚姻数の減少は中長期的には出生数の減少につながるかもしれない (千葉・仲田 (2022))。さらには一人で過ごす時間が増え過ぎると、孤独・鬱など心の健康に影響が生じるかもしれない。

図3：金融政策に影響を受ける様々なアウトカム



伝統的な金融政策は、短期政策金利の調整を通して様々なアウトカムに影響を与えられと考えられる。短期政策金利は長期政策金利への影響を介して、家計の消費・企業の投資活動に影響を与えられと考えられる。金融市場がグローバル化した現代では、ある国の国債金利の上昇は為替にも影響を与える。金融政策のスタンスの変化は将来の経済見通しへの影響を介して株価にも影響を与える。国債金利の変動は利息の変化を意味するため、国の財政にも影響を与える。また、金利環境は投資家のリスク行動への影響を介して金融システムの安定度合いにも影響を与え得る。例えば、低金利環境が長期化した2010年代の米国では、そういった金利環境が投資家をよりリスク行動に駆り立てた可能性も指摘されている。

政策決定者は政策が様々なアウトカムに与える影響を定量的に把握しておくことが望ましいが、それは事前的にも事後的にも困難である場合が多い。困難である理由は大きく分けて二つ考えられる。一つは政策効果・副作用に関する因果関係の識別が理論的に困難であること。もう一つは理論的に識別が可能でも識別に必要なデータが不足していることである。

この二つの困難さ（識別の理論的な困難さ・データ不足）を行動制限政策を例に説明する。ここでは事後

的に行動制限政策の感染抑制効果を試算したいとしよう。識別の理論的な困難さに関しては要因の一つとして、人々の感染予防行動は行動制限政策によってだけでなく、周囲の感染者数が増えて感染する確率が高くなることの恐怖心によって自主的に変化するかもしれないことが考えられる。周囲の感染者数が増えると自分が感染する確率が高くなる。感染すると少なくとも一時的に苦しい思いをするかもしれないし、日常生活を一時的に停止せざるを得ないかもしれない。場合によっては重症化し、死に至る可能性もある。そういった可能性を避けるために自主的に感染予防行動を取ることが推測される。感染が大きく広がって病床が逼迫し、仮に感染して重症化した際に適切な治療を受けられない可能性がある、特に自主的な感染予防行動を取るインセンティブは高くなると考えられる。

その一方で、感染がある程度拡大し病床使用率がある程度高くなったタイミングで政府は行動制限政策を打つ傾向にある。したがって、行動制限政策が打たれた後に感染が減少し始めても、その感染減少がどの程度恐怖心による自主的な行動変容によってもたらされているのかを識別するのが困難となる。

政策効果分析の二つ目の困難さはデータ不足である。因果関係の識別が理論的に可能であっても、それを行うためのデータが常に存在するとは限らない。例えば Takaku et al. (2022) は2021年2月の時短営業を分析しているが、使用している調査はコロナ危機初期には行われていなかったため、2020年4月5月の緊急事態宣言に関して似たような因果推論分析を行うことはできない。こういったデータ不足が事後的に行動制限政策の効果を試算する際の障害となる。

また、こういった試算が実際の政策決定の際に役に立つためには、事前にこういった政策効果試算が過去の似たような政策に関して様々な存在することが重要である。しかしながら、コロナ危機のように百年に一度と言われるような危機の際には過去の似たような政策の政策効果分析がそもそもほとんど存在しない。過去のパンデミックというと1918年のThe Great Influenzaがあるが、当時は今のように豊富なデータも存在しないため、1918年に採用された感染予防対策の効果に関する分析は稀である。

さらには、過去の似たような政策の効果が現代でも期待できるかどうかはわからない。例えば1918年のパンデミックの際にも様々な国でマスク着用が奨励されたが、仮にその感染拡大抑制効果に関する試算が存在していたとしても、それらが現代にどの程度当てはまるかは明瞭ではない。人々の行動様式が1918年と現代では違う。また、1918年のパンデミックと今回の新型コロナウイルスパンデミックではウイルスの性質（伝播性・発症率・重症化率・致死率等）が異なるため、仮に人々

の行動様式が現在と1918年で同じだとしても、1918年と今回のコロナ危機のマスク着用効果が同じである保証はない。

ある特定のパンデミックの最中に人々の行動様式やウイルスの性質が変化する可能性もある。例えば今回の新型コロナパンデミックでは、日本では第一回緊急事態宣言の際の人流削減には大きな経済活動の低下が伴った。しかしながら第二回以降の緊急事態宣言では第一回の時ほど強くは人流と経済活動が連動していない。第一回緊急事態宣言の経験を踏まえて大きな経済活動の低下を伴わずに人々の接触機会を減少させる術を学んだ、と言ってもよいかもしれない。

また、今回の新型コロナパンデミックでは感染の波によって主流となる新型コロナウイルスのVariant・Strain(変異株・系統)が変化した。例えば2021年4-5月の感染の波はアルファ株、2021年7-8月の感染の波はデルタ株、2022年1月以降の波はオミクロン株であることが指摘されている。そして、変異株によって発症率、重症化率、致死率が異なるのであれば、行動制限政策の感染抑制効果は変異株によって異なると考えられる¹⁾。

2. 日本のコロナ対策における数理モデル・データ分析

ここでは、日本のパンデミック対策において政策効果に関する分析がリアルタイムにどの程度提供されていたかについて考察する。ここでも緊急事態宣言をはじめとした行動制限政策に焦点を当てる。

重要ポイントは二つある。(1)行動制限政策が感染や病床に与える影響に関しては政策現場で大きな関心が集まり、そういった分析にはある程度のリソースが費やされた。(2)行動制限政策が社会経済に与える影響に関しては政策現場では大きな関心が集まらず、そういった分析にはあまりリソースは費やされなかった。

2.1 感染・病床への影響

行動制限政策は様々なアウトカムに影響を与えること、そして可能な限りそういった影響を分析できることが望ましいという話をしたが、日本では緊急事態宣言のような行動制限政策が感染・病床にどういった影響を与えるかに関する数理モデルシミュレーション分析に大きな注目が集まり、政策判断の参考資料として活用された。

2020年4月に発令された第1回緊急事態宣言の際には、当時北海道大学の西浦教授の数理モデル分析が「人と人の接触機会を最低7割、極力8割削減」とい

う目標設定で活用された。多様な分析を参考にしたいという専門家・政府の意向もあり、2020年秋には内閣官房AIシミュレーションプロジェクトがスタートし、それ以降、他の分野の数理モデル専門家も感染・病床シミュレーション分析に協力することになった。2021年前半を通して、内閣官房AIシミュレーションプロジェクトに参画していただくいくつかのチーム(畝見達夫研究室、大澤幸生研究室、倉橋節也研究室、栗原聡研究室)は多岐に渡るワクチン配分戦略分析を行い、こういった分析も政策現場で参照された。2021年1月・4月に発令された第2回・第3回緊急事態宣言の際には、後に内閣官房AIシミュレーションプロジェクトにも参画する私のチームの緊急事態宣言解除基準分析に注目が集まった。感染症の分野からは京都大学の古瀬祐気氏が2021年夏以降、様々な感染シミュレーションを政策現場に提供した。

2021年6月にはいくつかの研究チームが西村康稔新型コロナウイルス感染症対策担当大臣によって招集され、東京五輪時期の感染動向に関するシミュレーションが依頼された(内閣府(2021))。2021年7月に発令された第4回緊急事態宣言の際には、様々な研究チームのシミュレーションがデルタ株により7月後半に感染が急速に拡大することを示唆していたことが政策判断に影響を与えた。緊急事態宣言の発令が議論された7月8日の基本的対処方針分科会において、分科会メンバーである大竹文雄氏は以下のように述べている²⁾。

「デルタ株の影響が既に現れていて、現状の人流を前提とすると、7月後半に重症者の数が医療提供体制の限界を超えるという複数のシミュレーションが出ているということ。そしてその予測の確度が結構高いということをしかり説明していくことが必要だと思います。一方で、事前に対応することで、それを防ぐことができるという可能性を示すことが重要だと思います。」

2022年もオミクロン株到来の影響・まん延防止措置・3回目ワクチン接種等に関して、こういった様々な研究チームの感染・病床シミュレーションが政策現場で参照され続ける。

このように事前的なシミュレーション分析には大きな注目が集まり多大なリソースが投じられた一方、事後的な政策効果分析には大きな注目が集まったとは言い難い。政策現場で広く知られたものとして、第1回緊急事態宣言の自粛率を分析したWatanabe and Yabu(2021)、感染と緊急事態宣言の相関を分析した国立感染症研究所(2021)の二つがある。他にも行動制

¹⁾それぞれの変異株が流行した時期にはワクチン接種状況も違うため、ワクチン接種の影響と変異株の性質の違いの影響を識別することも重要であることには留意したい。

²⁾第11回新型インフルエンザ等対策推進会議 基本的対処方針分科会・議事録(2021年7月8日)。 <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/ful/taisakusuisin/taisyo/dai11/gijiroku.pdf>

限政策の感染への影響を分析した論文は幾つか登場したが (Takaku et al. (2022)、北村 (2022)、Inoue and Okimoto (2023)、仲田・岡本 (2022b))、そういった分析は厚労省 ADB・基本的対処方針分科会・新型コロナウイルス感染症分科会では一度も登場しない。

2.2 社会経済への影響

行動制限政策が感染や病床に与える影響に関して様々な事前シミュレーション分析が提示されたのとは対照的に、社会経済に与える影響に関する事前シミュレーション分析はほとんど登場しなかった。例えば緊急事態宣言の度に「接触機会を X %削減すると感染はこうなる」というシミュレーションが登場したが、それに対応するような社会経済への影響に関するシミュレーション (例えば、「接触機会を X %削減すると GDP・失業率はこうなる」) はほとんど登場していない。

例外として、第2回緊急事態宣言に登場した緊急事態宣言解除の目安となる人数の分析において、疫学マクロモデル (感染症モデルとマクロ経済学モデルを融合したモデル) を活用した仲田・藤井分析がある (Fujii and Nakata (2021))。ここでは緊急事態宣言の解除基準によって今後の感染動向だけでなく経済動向がどうなるかについても分析をしている。仲田・藤井分析の含意の一つに、少なくともワクチン接種が本格化する前であれば、感染抑制重視の姿勢は中長期的には経済活動にとっても悪くはない、というものがある。この定性的な知見は新型コロナウイルス感染症対策分科会・厚労省新型コロナウイルス感染症対策アドバイザーボード等でも紹介され、2021年前半の行動制限政策の議論においてある一定の役割を果たしている (藤井・仲田 (2021a, 2021b, 2021c))。

しかしながら、疫学マクロモデルによる感染シミュレーションの部分に対する需要の方が経済シミュレーションの部分に対する需要よりも高く、より信頼できる感染シミュレーションを提供するために2021年夏以降には仲田・藤井チームはモデルの感染の部分に拡張し、重症患者数・死者数のシミュレーション等を行い始める。2021年前半を除いては、経済シミュレーションの部分に関してはほとんど注目されず、またそれに関しての政府から分析依頼は一度もなかった。

厚労省 ADB・基本的対処方針分科会・新型コロナウイルス感染症対策分科会では行動制限政策に関して様々な議論が交わされたが、行動制限が社会経済に与える影響に関する分析は登場していない。日本経済学会新型コロナウイルス感染症ワーキンググループによる「新型コロナウイルス感染症に関する研究」によると、日本においてコロナ危機が消費・労働市場・教育に与えた影響に関する論文は多数あり、因果推論手法を用いて行動制限政策の影響を分析をしている論文

も少なくない³⁾。しかしながら、こういった行動制限政策の副作用に関する研究は行動制限政策の議論の場には紹介されていない。

3. 多様な分析の重要性

政策決定者が数理モデル分析を意思決定に活用する際には、一般論として多様な分析を参照することが望ましいと多くの分野で考えられている。数理モデル分析にはモデルの設定やパラメータの設定の段階で分析者の価値観がある程度反映されることもあり、様々な価値観が反映された幾つかの分析を眺めることで、結果のどこまでを客観的なものとしてみなしてよいか、どこからが主観に依存するのかがより理解できるようになる。またいくつかの分析を眺めることで、特定の分析に依存していたら気が付けないかもしれないことに気が付くことができるかもしれない。分析手法によって分析結果が大幅に異なる場合には、直面している状況の不確実性の大きさを確認できるかもしれない。

日本では多様な視点から感染シミュレーションを行うことの重要性がある程度理解されており、セクション2.1で触れたように、そういった分析体制に徐々にではあるが移行することに成功した。内閣官房 AI・シミュレーションプロジェクトの座長を務めた北野宏明氏は多様な視点からの分析の重要性を以下のように語っている。

「運営方針としてはすごく明確で、透明性、再現性、オープンコラボレーション。それと、シミュレーションのところは、第一波のときに西浦先生がかなり前面にでて SIR モデルでされていた。我々のところは、SIR モデルっていうのはもちろんスタンダードなやり方なので、それはもちろん前提としてある程度やるのであるが、マルチエージェントであるとか、population の heterogeneity であるとか、人と人の interaction というのはランダムではなくてだいたい乗乗則に沿っていたりとか、色々な複雑系の数理でわかっている社会の仕組みとか統計的な性質があるので、それを全面的に入れたシミュレーションにしないとだめだろうなという風に思ったので、そういうことをやっている人を探し出して入ってもらいました。それと同時に、一つのチームの結果がどうなるということではなくて、複数のチームを作って A チーム・B チームで実際には 5 チーム最後作ったんですけど、微妙に違うアプローチでやってもらって、それが一致するのか違うのかとかというので、一個のチームにいろいろな意味での負担をかけないようにするというか、リスクを負わせないようにして、相互検証もできるような形で作りました。」

³⁾ <https://covid19.jeaweb.org/> 日本経済学会新型コロナウイルス感染症ワーキンググループの活動については岩本 (2023c) を参照。

厚生労働省 ADB の座長を務めた脇田隆字氏は、藤井・仲田分析が感染シミュレーション分析に参入したことに関して、政策分析の多様性の重要性を示唆する以下のようなコメントをしている（仲田・藤井（2022））。

「COVID-19 の流行当初からしばらくの間は、専門家会議、分科会、アドバイザリーボードでの感染状況の議論において、感染症疫学の専門家の数理モデルを用いた分析が重要な材料となっていました。2021 年初めに、大阪大学の竹文雄さんからの紹介で仲田・藤井チームの分析に接することとなりました。われわれとしても、複数の専門家の分析を比較することにより、議論が深まることを期待していました。」

4. 今後のパンデミック対策への教訓

感染症数理モデル分析の役割に関しては、少なくとも二つの教訓が考えられる。

上記したように、日本では感染シミュレーション分析に多大なリソースが費やされ、いくつかの研究チームが行動制限政策等の効果についてリアルタイムに感染シミュレーションを提示できる体制が確立した。しかしながら、その体制の確立には時間がかかった。特に日本ではパンデミック初期にある特定の SIR モデル分析に依存せざるを得なかった。そして、最近の研究で指摘されているように、その SIR モデル分析にはフロー変数とストック変数の混同がある等、先進国の重要な政策決定の根拠としては物足りない分析であった可能性がある（仲田・芳賀沼・塚原（2023a, 2023b）、岩本（2023a, 2023b））。次のパンデミックでは、パンデミックの初期対応の時点で政策決定者が様々な感染シミュレーション分析を参照できる体制を準備することが望ましいと言える。

また、感染症数理モデルが様々な場面で活用されたことは喜ばしい一方、日本での行動制限政策に関する議論を眺めると、一部の人は数理モデル分析の結果を科学的真実として受け止められているのではないかと思わせられる場面も多い。仲田（2023）は、厚労省アドバイザリーボードの議事録と FRB の議事録の比較を基にこの点を指摘している。数理モデル分析は政策議論を建設的にし、リスクコミュニケーションの重要な一部となる可能性を秘めているが、分析結果の発信のされ方や受け止められ方によってはある特定の政策に「科学のお墨付き」を与える便利な道具として使用されるリスクがある。今回のようなパンデミックが 100 年に一度の危機であるならば、数理モデル分析の受け手側に数理モデル分析のリタラシーが不足していても不思議はない。次のパンデミックでは、数理モデル分析を科学的真実として受け止めるのではなく、議論のたたき台・参考資料の一つとして認識し、そのように活用できるようになっていることが望ましい。

5. おわりに

日本においては、数理モデル分析・データ分析の感染症政策への応用は今後ますます重要になると考えられる。自分の分析スキルで直接的に社会貢献をしたい研究者にとってはエキサイティングな分野だと言える。また、直接的に社会に貢献することに興味が無くても、価値のある基礎研究はそういった応用研究の礎となる。社会的インパクトのある研究に引用されるのは研究者にとってエキサイティングである。

日本社会で感染症数理モデル分析の社会実装を進めていく際には、数理モデル分析の活用が既に進んでいる他分野から学べるが多々ある。人々の生活に大きな影響を及ぼす政策を分析して政策現場で参照してもらう際には、政策分析の基本・リスクコミュニケーションの基本を抑えていないと、研究者が意図せずに民主的な政策決定過程を歪めてしまったり、研究者自身・研究分野全体の社会的信頼を失墜させてしまうリスクすらある。日本人研究者による EBPM (Evidence-Based Policy Making) に関するいくつかの文献は、感染症数理モデル専門家が分析を社会に直接的に役立てようとする際に有用であると考えられる（大竹・内山・小林（2022）、佐藤・松尾・菊地（2024））。

コロナ危機から正しい教訓を学び、そして数理モデル活用が定着している他分野から学びつつ、数理モデル分析が今後より一層日本の感染症政策に貢献できるようになることを願っている。

参考文献

Fujii, Daisuke and Taisuke Nakata (2021): Covid-19 and Output in Japan. *The Japanese Economic Review*, Special Issue: SIR Model and Macroeconomics of COVID-19, 72(4), pp. 609-650. <https://doi.org/10.1007/s42973-021-00098-4>

Inoue, Tomoo and Tatsuyoshi Okimoto (2023): Exploring the Dynamic Relationship between Mobility and the Spread of COVID-19, and the Role of Vaccines, *Applied Economics*. <https://doi.org/10.1080/00036846.2023.2269630>

Takaku, Reo and Izumi Yokoyama (2021): What the COVID-19 school closure left in its wake: Evidence from a regression discontinuity analysis in Japan. *Journal of Public Economics*, 195: 104364. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2020.104364>

Takaku, Reo, Izumi Yokoyama, Takahiro Tabuchi, Masaki Oguni and Takeo Fujiwara (2022): SARS-CoV-2 suppression and early closure of bars and restaurants: a longitudinal natural experiment. *Nature Scientific Reports*, 12(1), pp.1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16428-4>

- Watanabe, Tsutomu and Tomoyoshi Yabu (2021) Japan's Voluntary Lockdown, PLoS ONE 16(6): e0252468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252468>
- 稲葉寿 (2020): 感染症の数理モデル https://www.youtube.com/watch?v=eDSLdMa0H_8
- 岩本康志 (2023a): 「接触 8 割削減」の科学的根拠 <https://iwmtys.com/Docs/2023/2023cj306.pdf>
- 岩本康志 (2023b): 「接触 8 割削減」の代替案の説明 <https://iwmtys.com/Docs/2023/Sesshoku8wariSakugennoDaitaiannoSetsumeii.pdf>
- 岩本康志 (2023c): 政策形成における経済学の役割: 事例研究 新型コロナウイルス感染症
- 大竹文雄・内山融・小林庸平 (2022): EBPM: エビデンスに基づく政策形成の導入と実践
- 北村周平 (2022): まん延防止等重点措置の政策評価レポート https://www.dropbox.com/s/2l3ruk1z17a7sn2/Mambo_v1.pdf?dl=0
- 国立感染症研究所 (2021): まん延防止等重点措置と緊急事態宣言が新型コロナウイルス感染症の流行動態に及ぼした効果に関する定量的評価 (暫定版). <https://www.niid.go.jp/niid/images/epi/corona/covid19-47.pdf>
- 佐藤靖・松尾敬子・菊地乃依瑠 (2024): EBPM の組織とプロセス: データ時代の科学と政策
- 千葉・仲田 (2022): コロナ禍における婚姻と出生 <https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/policy-analysis-42/>
- 千葉・仲田 (2023): コロナ禍における交際件数の推移 <https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/policy-analysis-78/>
- 内閣府 (2021): 民間の有識者等のシミュレーション結果概要 https://corona.go.jp/minister/pdf/kishakaiken_shiry_20210618.pdf
- 仲田泰祐 (2023): パンデミック政策における EBPM <https://www.crepe.e.u-tokyo.ac.jp/results/2023/crepedp149.html>
- 仲田泰祐・岡本亘 (2022b): 行動制限・情報効果 (恐怖心効果) に関する実証分析のまとめ <https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/policy-analysis-10/>
- 仲田泰祐・芳賀沼和哉・塚原悠貴 (2023a): 第一波感染シミュレーションの再現性 <https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/policy-analysis-65/>
- 仲田泰祐・芳賀沼和哉・塚原悠貴 (2023b): 第一波感染シミュレーションの再現性: 政策含意 <https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/policy-analysis-65/>
- 藤井大輔・仲田泰祐 (2021a): コロナ感染と経済活動の中・長期見通し. 第 37 回厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード・資料 3-5 (2021 年 6 月 2 日) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000787730.pdf>
- 藤井大輔・仲田泰祐 (2021b): コロナ感染と経済活動の中・長期見通し. 第 39 回厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード・資料 3-5 (2021 年 6 月 16 日) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000793716.pdf>
- 藤井大輔・仲田泰祐 (2021c): コロナ感染と経済活動の中・長期見通し. 第 41 回厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード資料 3-5 (2021 年 6 月 30 日) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000800003.pdf>
- 藤井大輔・仲田泰祐 (2022): 『コロナ危機、経済学者の挑戦』、日本評論社

学会事務局からのお知らせ

1. 2024年日本数理生物学会年次総会の報告

2024年の年次総会が日本数理生物学会年会（2024年9月11日～9月13日・北海道大学）に合わせて開催されます。詳しい日時と会場は未定ですので、追ってBiomath メーリングリストや Web ページなどでお知らせします。

2. Biomath メーリングリスト登録のお願い

日本数理生物学会では、会員と会員でない数理生物学会に関心をお持ちの方々との交流や情報交換を目的とする、Biomath メーリングリストを運営しています。Biomath メーリングリストには、学会や会員からの重要な情報（大会情報、国内外の公募情報、研究会や定例セミナーの情報、学会賞の情報など）が投稿されますので、日本数理生物学会に新規に入会される際には、合わせてBiomath メーリングリストへの登録をお願いします。また、現在会員の方でBiomath メーリングリストに未登録の方にもぜひ登録いただきますようお願いいたします。未登録の方は、本文も件名も空白の電子メールを biomathml-subscribe@brno.ics.narawu.ac.jp にお送りください。確認メールが返送されますので、それに返信していただくとBiomath メーリングリストに入会することが出来ます。登録された皆様

の電子メールアドレスは厳重に管理します。登録者以外からは投稿できないシステムになっておりますので迷惑メールの心配もありません。配送頻度も週に1通程度となっております。その他、Biomath メーリングリストに関しましては <https://jsmb.jp/biomath-ml/> に記載しております。合わせてご覧ください。

3. 会費納入のお願い

クレジットカード決済と銀行振込による会費納入が可能となっておりますので、是非ご利用ください。会員管理システムの操作方法が不明な場合は、学会HPやニュースレター（第93号）をご確認ください。

4. 事務局新メンバーのお知らせ

2024年4月より、事務局新メンバーとして入谷亮介さん（理研）に加わっていただくことになりましたのでご報告させていただきます。

5. 事務局連絡先

事務局幹事長：黒澤 元

会計：瓜生 耕一郎

事務局幹事：中丸 麻由子, 山口 幸, 入谷 亮介

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2丁目1 理化学研究所
数理創造プログラム (iTHEMS)

E-mail: secretary@jsmb.jp

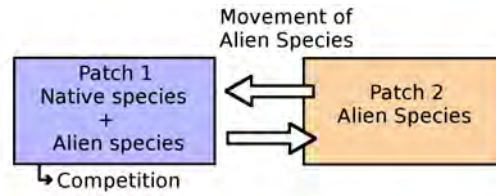
Population dynamics models on the species persistence in the native habitat with the invasion of alien species

Victor SCHNEIDER

東北大学大学院情報科学研究科 情報基礎科学専攻

In this dissertation, we explore the dynamics involving alien and native species within the context of an invasion, using mathematical modeling and analysis. We study the various factors influencing their interactions and the consequences of their competition. We focus especially on the impact of migrations and of habitat characteristics, such as size and fragmentation.

We begin with a two-patch model representing an invasion of a native habitat by an alien species and the ensuing competition for resources. The traditional Lotka-Volterra competition model serves as our starting point. To emulate the invasion we consider that the native species exist in only one of the two patches, and only the alien species has the capacity to migrate between the two patches.



We call N the population size of the native species, A_i the population size of the alien species in patch i and m_{ij} the migration rate of the alien species from patch j to patch i . The coefficients r_N and r_A (respectively K_N and K_A) are the intrinsic growth rates (respectively the carrying capacities) of the indicated species, while the coefficients c are the competition effects.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = r_N \left(1 - \frac{N}{K_N} - \frac{c_{12}A_1}{K_N} \right) N; \\ \frac{dA_1}{dt} = r_{A1} \left(1 - \frac{c_{21}N}{K_{A1}} - \frac{A_1}{K_{A1}} \right) A_1 + m_{12}A_2 - m_{21}A_1; \\ \frac{dA_2}{dt} = r_{A2} \left(1 - \frac{A_2}{K_{A2}} \right) A_2 - m_{12}A_2 + m_{21}A_1. \end{cases}$$

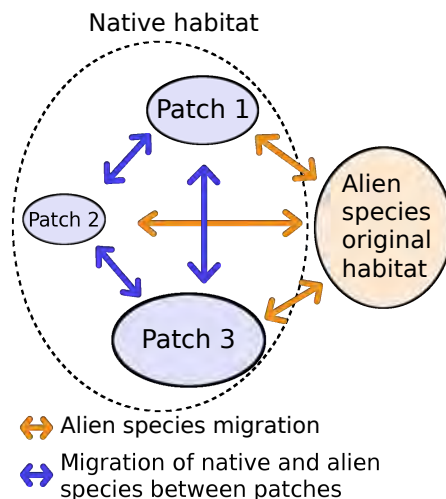
We established that, like the Lotka-Volterra model, our model also allows for the extinction of the alien species, native species, or the coexistence of both. However, the addition of migration rates provides new perspectives, elucidating that a high immigration rate of the alien species into the native habitat negatively impacts the survival chances of the native species, while on the other hand causing the alien species' own potential extinction under specific conditions. This analysis also shows that if the competition effect on the native species is high or low enough, the result of the competition is independent of migration rates.

In order to see the effect of the habitat characteristics in the same situation as described previously, we also modeled it in a continuous space.

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = \begin{cases} r_N \left(1 - \frac{N}{K_N} - c_{12} \frac{A}{K_N} \right) N, & x \in [0, l]; \\ 0, & x \in (l, L); \end{cases} \\ \frac{\partial A}{\partial t} = r_A \left(1 - c_{21} \frac{N}{K_A} - \frac{A}{K_A} \right) A + D_A \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}, & x \in [0, L]. \end{cases}$$

In this model, l is the size of the patch 1, L is the total size of both habitat combined, and D_A is the diffusion coefficient of the alien species. Furthermore, we consider an isolated environment, so we adopt the no-flux (Neumann) boundary conditions at $x = 0$ and $x = L$. The analysis reveals that a smaller total habitat increases the chance of a failed invasion if the alien species faces substantial competition. Interestingly, we also found that if the size of the shared habitat decreases, an initially unsuccessful invasion could then become successful, which could then lead to coexistence or, more drastically, extinction of the native species.

We delved into the topic of habitat fragmentation as well, and its impact on a native species persistence while invaded by an alien species.



We assumed that the habitat fragmentation alters the availability of a resource limiting the reproduction in each patch, and that the intrinsic renewal dynamics of the resource is much faster than the population dynamics in the habitat. Finally, a higher resource availability in a patch induces a higher immigration rate into the patch.

$$\begin{cases} \frac{dN_i}{dt} = \alpha_N \left(-R_N^c + p_i \frac{\lambda}{\gamma} - \frac{\beta_N}{\gamma} N_i - \frac{\beta_A}{\gamma} A_i \right) N_i - m_N N_i + \frac{p_i}{P_n} m_N \sum_j N_j; \\ \frac{dA_i}{dt} = \alpha_A \left(-R_A^c + p_i \frac{\lambda}{\gamma} - \frac{\beta_N}{\gamma} N_i - \frac{\beta_A}{\gamma} A_i \right) A_i - m_A A_i + \frac{p_i}{P_n} m_A \sum_j A_j \\ - m_0 A_i + \frac{p_i}{P_n} M_0 A_0. \end{cases}$$

The coefficients β_N , β_A and α_N , α_A represent respectively resource consumption and the conversion of the resource consumption to the reproduction. λ (resp. γ) is the intrinsic renewal rate (resp. decay coefficient) of the resource. The coefficients R_N^c , R_A^c are the least resource values needed for the reproduction, and R_0^* is the equilibrium resource density without the habitat fragmentation. The coefficients m_N , m_A are the migration rates between patches in the native habitat. $M_0 A_0$ is the net invasion rate of the alien species in the native habitat, while m_0 is its net return rate to its original habitat. Finally, p_i is the coefficient of resource availability at patch i , and P_n is the sum of p_i over all n patches, where n is the total number of patches.

Our findings suggest that the existence of one patch with sufficiently high resource availability is relevant for the persistence of the native species. Importantly, habitat fragmentation can be beneficial for the persistence of the native species by moderating the competition with an alien species in each patch or by changing the resource availability.

The mathematical models and insights generated in this thesis contribute to the understanding of invasion dynamics and the consequences of changes to habitats, and can help guide strategies for conservation and management.

Population dynamics models on the relation of social nature to the epidemics

Ying XIE

東北大学大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻

In this work, we consider three mathematical models incorporating social nature from the aspects of social response, community's policy, and detectability of the disease infection, respectively.

In the model incorporating social response, we let $S(t)$ and $I(t)$ be the susceptible and infective population densities in the community at time t , while $M(t)$ represents the strength of the social response at time t .

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta(M)IS + qI \\ \frac{dI}{dt} &= \beta(M)IS - qI \\ \frac{dM}{dt} &= \Gamma(I) - \mu M,\end{aligned}$$

where q is the recovery rate and μ is the natural decay rate of the social response. The coefficient of disease transmission $\beta = \beta(M)$ is given by a decreasing, positive, and differentiable function of $M \in [0, \infty)$. The initial condition is given by $S(0) > 0$, $I(0) > 0$, and $M(0) = 0$, which means that there is no social response at the beginning of the disease spread. Then people are unconcern about the disease spread.

The social sensitivity function $\Gamma(I)$ represents the nature of the social response according to its sensitivity to the disease spread. In this model, we assume that the social response does not arise as long as the infective population density is not beyond a threshold value I_c :

$$\Gamma(I) := \begin{cases} 0 & \text{for } I \leq I_c; \\ \gamma(I - I_c) & \text{for } I > I_c. \end{cases}$$

Positive parameter γ is the social sensitivity coefficient, and I_c is the threshold value for infective population density to raise the social response. We analyze the model especially about the emergence of an oscillatory behavior of the solution regarded as recurring epidemic outbreaks, and we find that the strong social insensitivity would stabilize the temporal variation of the infective size, certainly raising the endemic size.

For the model incorporating community's policy, we consider the influence of visitors on the spread of a reinfectious disease in a community, especially assuming that a certain proportion of accepted visitors are immune.

$$\begin{aligned}\text{Dynamics for the visitor population:} & \left\{ \begin{aligned} \frac{dS_v}{dt} &= (1 - \rho)\Lambda - \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} S_v - qS_v; \\ \frac{dI_v}{dt} &= \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} S_v + \epsilon \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} R_v - \gamma I_v - qI_v; \\ \frac{dR_v}{dt} &= \rho\Lambda + \gamma I_v - \epsilon \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} R_v - qR_v; \end{aligned} \right. \\ \text{Dynamics for the resident population:} & \left\{ \begin{aligned} \frac{dS_r}{dt} &= -\beta \frac{I_r + I_v}{N + m} S_r - \sigma S_r; \\ \frac{dI_r}{dt} &= \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} S_r + \epsilon \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} R_r - \gamma I_r; \\ \frac{dR_r}{dt} &= \sigma S_r + \gamma I_r - \epsilon \beta \frac{I_r + I_v}{N + m} R_r, \end{aligned} \right.\end{aligned}$$

where S_v , I_v , and R_v are the subpopulation sizes of susceptible, infective, and immune visitors respectively. Similarly S_r , I_r , and R_r are the corresponding subpopulation sizes about the residents. The population sizes of residents and visitors staying in the community are denoted by $N = S_r + I_r + R_r$ and $m = S_v + I_v + R_v$ respectively. The resident population size N is constant independently of time t , as seen from $d(S_r + I_r + R_r)/dt = 0$ for any t by the system. Parameter ρ is the proportion of immune visitors at the entry ($0 \leq \rho \leq 1$). Proportion $1 - \rho$ of visitors is susceptible at the entry. Parameter q is the per capita exit rate of visitor. Thus the expected duration of a visitor's stay in the community is given by $1/q$. Parameter $\epsilon\beta$ is the reinfection coefficient for immune resident and visitor, while β is the infection coefficient for susceptible ones.

With the mathematical results obtained by the analysis on the model for such an epidemic dynamics of resident and visitor populations, we find that the acceptance of visitors could have a significant influence on the disease's endemicity in the community, either suppressive or supportive.

To consider the detectability of the disease infection, we consider a mathematical model on the epidemic dynamics of a disease transmission with n strains which follows an order of competitive dominance according to the infection success in the host:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu N - \sum_{k=1}^n \beta I_k S - \mu S; \\ \frac{dI_1}{dt} &= \beta I_1 S + \sum_{k=2}^n \epsilon \beta I_k I_1 - \sigma_1 I_1 - \rho_1 I_1 - \mu I_1; \\ \frac{dI_j}{dt} &= \beta I_j S + \sum_{k=j+1}^n \epsilon \beta I_k I_j - \sum_{k=1}^{j-1} \epsilon \beta I_j I_k - \sigma_j I_j - \rho_j I_j - \mu I_j \quad (1 < j < n); \\ \frac{dI_n}{dt} &= \beta I_n S - \sum_{k=1}^{n-1} \epsilon \beta I_k I_n - \sigma_n I_n - \rho_n I_n - \mu I_n; \\ \frac{dQ_k}{dt} &= \sigma_k I_k - \alpha_k Q_k - \mu Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, n); \\ \frac{dR}{dt} &= \sum_{k=1}^n \rho_k I_k + \sum_{k=1}^n \alpha_k Q_k - \mu R, \end{aligned}$$

where S , I_k , Q_k , and R are population densities of susceptibles, infectives who hold strain k , corresponding isolated and recovered individuals respectively. The total population size is denoted by $N = S + \sum_{k=1}^n I_k + \sum_{k=1}^n Q_k + R$. βI_k gives the infection force of strain k for the susceptible with the coefficient β , and $\epsilon \beta I_k$ gives that for the infective with strain j of the lower dominance. Parameter σ_k is the quarantine rate for the infective who holds strain k , which reflects the detectability of strain k . Parameters α_k and ρ_k are the recovery rates for the infective with strain k under and out of the isolation, respectively. μ is the natural death rate. We are focusing on the dependence of the endemic/epidemic size on the distribution of the detectabilities of multiple strains and trying to discuss further the influence of superinfection on the endemic/epidemic size by the analysis on our model.

Reference

- [1] Xie, Y., Ahmad, I., Ikpe, T.I.S., Sofia, E.F., Seno, H. (2024). What Influence Could the Acceptance of Visitors Cause on the Epidemic Dynamics of a Reinfected Disease?: A Mathematical Model. *Acta Biotheor.*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s10441-024-09478-w>